

文章编号: 1671-1637(2009)06-0064-05

基于人工势场算法的改航路径规划

徐肖豪¹, 李成功¹, 赵焱飞¹, 李雄²

(1 中国民航大学 空中交通管理研究基地, 天津 300300; 2 南京航空航天大学 民航学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 在恶劣天气或流量受限条件下, 建立了基于人工势场算法的改航路径规划模型。考虑空中交通管制程序和飞行性能等约束条件, 采用线性拟合的方法对初始改航航路径进行分段拟合, 消除振荡点和误差较大的离散点; 对拟合后的航段通过截弯取直的方法, 去除多余的转弯点, 生成最终的改航路径。仿真结果表明: 现行的沿扩展受限区边界绕飞的改航路径长度为 532.299 km, 而采用新改航规划模型生成的改航路径长度为 455.924 km, 在没有增加额外转弯点的条件下, 航线长度减少了 14.35%, 因此, 采用该规划方法可安全有效地避开飞行受限区域。

关键词: 空中交通规划; 改航路径; 人工势场算法; 分段线性拟合

中图分类号: V355 文献标志码: A

Rerouting path planning based on artificial potential field algorithm

XU Xiaohao¹, LI Chenggong¹, ZHAO Yifei¹, LI Xiong²

(1. Air Traffic Management Research Base, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

2. School of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, Jiangsu, China)

Abstract: Under severe weather or flow constrained areas, a new rerouting path planning model based on artificial potential field algorithm (APFA) was proposed. Considering air traffic control (ATC) program and flight performance, linear sub-fitting method was used to fit the initial rerouting path, so that the vibration and discrete points were eliminated. A curve cut-off method was used to eliminate the extra turning points, and the final flight path was generated. Simulation result shows that the length of the rerouting path flying around expanded area boundary is 532.299 km, but the length of the new generated rerouting path is 455.924 km, the path length reduces by 14.35% under the condition that the turn points aren't added. So the flow constrained area can be avoided safely and effectively by using the proposed method. 6 figs, 10 refs.

Key words: air traffic planning; rerouting path; APFA; linear sub-fitting

Author resume: XU Xiaohao (1949), male, professor, +86-22-24092881, xuxhao2008@sina.com.

0 引言

对于航班改航路径的研究始于 20 世纪 90 年代初, 具有代表性的算法主要有: 基于几何算法的改航路径规划方法^[1], 基于凸多边形的改航路径规划方法^[2], 基于已有网络流的航路点 A* 搜索算法^[3-4],

基于自由飞行的改航路径规划方法^[5]。但以上方法不足之处在于: 未充分考虑航线结构、航空器性能以及管制员工作负荷等相关限制因素, 目标函数多为只考虑飞行路径最短的单目标, 针对巡航阶段改航问题的研究较少且以终端区为主, 此外计算量较大, 无法满足实时性要求等。本文借鉴在机器人路径规

收稿日期: 2009-07-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(60972006); 国家 863 计划项目(2006AA12A105)

作者简介: 徐肖豪(1949-), 男, 浙江金华人, 中国民航大学教授, 从事空中交通规划、管理与仿真研究。

划中普遍采用的人工势场算法, 考虑了航线结构和空中交通管制程序以及航空器飞行性能对改航路径的约束, 建立了基于人工势场算法的动态改航路径规划模型, 通过构建目标引力场、受限区斥力场, 实现改航路径的快速实时规划, 最后通过仿真算例验证其可行性。

1 航空器的人工势场路径规划模型

1.1 传统人工势场路径规划模型

根据文献[6-7] 建立航空器的传统人工势场路径规划模型, 将航空器简化为一点, 它的运动空间为二维的。航空器在运动空间中任意位置 X 处的目标引力势函数定义为

$$U_A(X) = \frac{1}{2}k \|X - X_A\|^2 \quad (1)$$

$$X = (x, y)^T$$

吸引力为目标引力势函数的负梯度, 即

$$F_A(X) = -\text{grad}[U_A(X)] \quad (2)$$

式中: k 为引力位置增益系数; X 为航空器当前位置矢量; X_A 为目标位置矢量; $\|X - X_A\|$ 为航空器与目标点间的欧氏距离。

受限区斥力势函数定义为

$$U_i(X) = \begin{cases} \frac{1}{2}\eta \left(\frac{1}{\rho_i} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2 & \rho \leq \rho_0 \\ 0 & \rho > \rho_0 \end{cases} \quad (3)$$

相应的斥力为

$$F_i(X) = -\text{grad}[U_i(X)] = \begin{cases} \eta \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} \right) \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial \rho}{\partial X} & \rho \leq \rho_0 \\ 0 & \rho > \rho_0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: η 为斥力位置增益系数; ρ_0 为受限区影响的最大距离范围; i 为受限区编号, 且 $1 \leq i \leq M$, M 为受限区的总数目; ρ 为航空器在空域中距离受限区 i 的最短欧氏距离。

航空器在空域中所受合力为

$$F_T(X) = F_A(X) + \sum_{i=1}^M F_i(X) \quad (5)$$

航空器从航线起始点开始在合力作用下, 沿合力方向以固定步长 l 自动避开受限区, 并一步步趋向目标点, 其引力和斥力见图 1。

1.2 改进人工势场路径规划模型

在采用传统人工势场路径规划模型进行航空器改航路径规划时, 在狭窄区域容易发生振荡现象, 导致航空器左右来回运动, 不能继续前进, 造成了规划

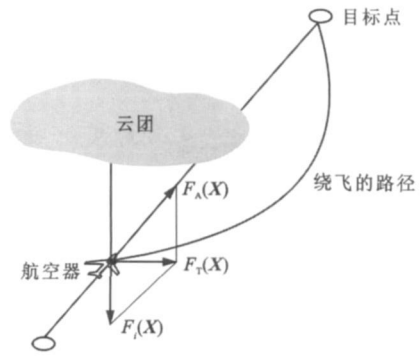


图 1 引力和斥力

Fig. 1 Attraction and repulsion

的不稳定, 而且在航空器向目标逼近时, 目标对航空器的引力减少, 若目标点附近的斥力场函数不变, 则规划不易到达目标点。

为解决传统的人工势场路径规划模型存在的缺陷, 本文采用复合指数函数构造斥力势函数, 使得航空器在受限区附近生成的改航路径较为平缓, 并把航空器与目标之间的相对欧氏距离 $\|X - X_A\|$ 也考虑进去^[8], 从而使飞机向目标逼近时, $\|X - X_A\|$ 减小, 使得斥力场也减少, 那么目标点将是整个势场的全局最小值点。改进的斥力势函数为

$$U'_i(X) = \begin{cases} \frac{1}{2}\eta_i (e^{\rho_i - \rho_0} - 1)^2 \|X - X_A\|^2 & \rho \leq \rho_0 \\ 0 & \rho > \rho_0 \end{cases} \quad (6)$$

受限区的改进斥力为

$$F'_i(X) = -\text{grad}[U'_i(X)] = \begin{cases} F'_{i1}(X) + F'_{i2}(X) & \rho \leq \rho_0 \\ 0 & \rho > \rho_0 \end{cases} \quad (7)$$

$$F'_{i1}(X) = \eta_i (1 - e^{\rho_i - \rho_0}) e^{\rho_i - \rho_0} \|X - X_A\|^2 \frac{\partial \rho}{\partial X}$$

$$F'_{i2}(X) = \eta_i (e^{\rho_i - \rho_0} - 1)^2 \|X - X_A\|$$

式中: $F'_{i1}(X)$ 、 $F'_{i2}(X)$ 为 $F'_i(X)$ 的 2 个分力。

2 改航路径点的修正

2.1 改航路径评估因素

(1) 与雷暴云的最小距离 D_{min} : 航空器绕雷暴云飞行时, 应根据雷暴强度在雷暴回波边缘 25 km 以外通过^[9-10]; 如果在两块雷暴云之间穿过时, 应从空隙中最大处(两雷暴云直接空隙应不小于 50~70 km)穿过。

(2) 航线总的距离 L : 生成的临时航线总的长度必须小于或等于一个预先设置的最大距离, 它保证航空器在某一固定时间内必须到达目标, 并受航空器的燃料供应量限制。

(3) 最小航线段长度 l_{SD} : 它限制航空器在开始改变飞行姿态之前必须直飞的最短距离, 其长度应满足在该距离内航空器可顺利完成 2 次转弯(转弯角 $\theta \leq 90^\circ$)。通常 $l_{SD} \geq 7.4 \text{ km}$ 即可满足最短航线距离约束。

(4) 改航点数量 N : 为减少导航误差, 避免过度增加飞行员和管制员在实施改航过程中的工作负荷, 航空器在远距离飞行时一般不希望迂回行进和频繁的转弯, 改航点数量每 100 km 不应多于 1 个。一般通过截弯取直的方法, 除去初始航迹中一些转弯点, 使生成的航迹较为平滑。

(5) 最大转弯角度 θ_{max} : 它限制生成的航迹只能在小于或等于预先确定的最大角度范围内转弯。该约束条件取决于具体航空器的性能, 通常最大角度限制在 $\pm 90^\circ$ 范围内。

2.2 修正方法

本文采用分段线性拟合的方法消除离散点, 从转弯角度较大的改航路径点中选出分段点, 然后对各段进行最小二乘法的线性拟合, 并求出相邻拟合线段所在直线的交点, 依次连接起点、拟合线段所在直线的交点和目标点, 生成拟合后的改航路径; 分析该路径是否符合航线约束条件, 若满足则输出该改航路径; 否则, 重新确定分段点, 进行分段线性拟合, 并通过增加或减少转弯点的方式, 对拟合后的改航路径进行修正, 直到满足航线约束条件要求。具体的基于人工势场算法的改航路径规划流程见图 2。

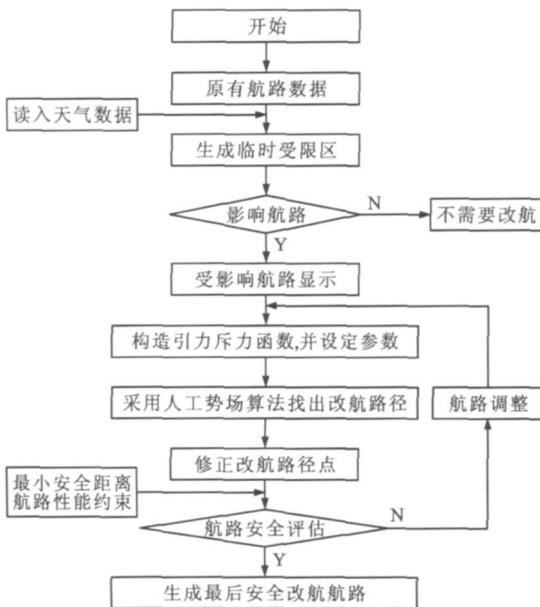


图 2 规划流程

Fig. 2 Programming flow

3 算例分析

中国西南部为雷暴多发地区, 本文以昆明—桂林航线为例, 当该航线受雷暴天气影响而无法正常使用, 运用所建路径规划模型实施改航, 验证该方法的有效性, 并与现行的沿扩展飞行受限区边界绕飞的改航方法^[2, 10]作对比分析, 具体步骤如下。

3.1 航线受限态势

昆明—桂林航线所经航路点为: 昆明(KMG) — 过马河(SL) — P72 — 贵阳(KWE), 通过 Mercator 投影建立经纬度与 x, y 轴的投影关系, 则 KMG、SL、P72 和 KWE 在该平面直角坐标系中坐标分别为 $(-124\ 822\ 0, 64\ 276\ 4)$ 、 $(-118\ 678\ 8, 68\ 373\ 6)$ 、 $(-103\ 965\ 2, 71\ 636\ 6)$ 和 $(-82\ 268\ 4, 76\ 852\ 4)$, 见图 3 实线所示。根据天气预报生成航线受限态势图, 图 3 中阴影部分为雷暴云团 A、B、C, 假设 3 个雷暴云团如箭头所示向东北方向匀速漂移, 漂移速度为 $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 云团的形状、面积和强度保持不变, “...” 线构成的图形描述了云团的运动趋势, 每 15 min 更新一次。

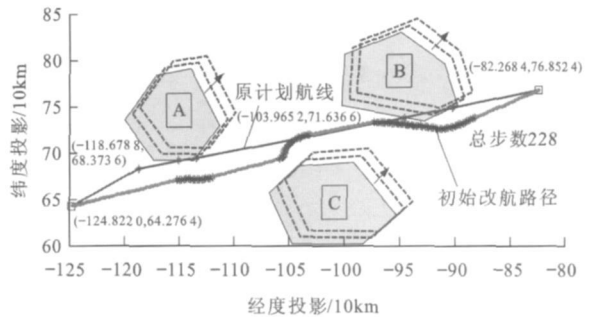


图 3 采用改进人工势场路径规划模型生成的初始改航路径

Fig. 3 Initial rerouting path generated by improved APFA path planning model

3.2 采用改进人工势场法进行改航路径规划

参数设定: k 为 7, η 为 1, ρ_0 为 25 km。假设航空器的巡航速度为 $800 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 航空器移动步长 l 为 2 km, 最大行进步数 J 为 400 步, 当航空器与目标点距离小于 l 或运行步数大于 J 时, 退出规划。采用人工势场模型中的式(2)、(5)、(7)进行路径规划, 生成的初始改航路径见图 3 中点线所示, “.” 表示航空器在合力作用下所走的路径, “*” 表示航空器与障碍物的距离小于安全距离 D_{min} 的路径点, 航空器共运行了 228 步。

3.3 改航路径点修正

分析图 3 中生成的初始改航路径, 确定线性拟

合的分段点, 将初始的改航路径分成 7 段进行线性拟合, 并计算出拟合后 7 段航线的交点, 将交点顺次连接, 生成拟合的改航路径, 见图 4(a); 让航空器在拟合的改航路径中以步长 l 飞行, 共运行 234 步, 并将不满足最小距离约束的点用“*”表示出来; 对拟合后的改航路径的评估见图 4(b)、(c), 图 4(b) 中折线表示拟合后各航段的航线角度变化, 并标注了各航路点的转弯角度; 图 4(c) 显示了航空器在拟合后的各航段飞行时与受限区的最小距离。

由图 4 可知: 第 6、7 航段与受限区的最小距离不符合要求; 第 2、3、4、6 航段的长度不满足最小航段长度的要求, 需要进一步调整。本文通过截弯取

直和航段点平移的方法调整或整合不符合要求的航段, 以减少总航线长度, 并使调整后的航段都满足约束条件。具体调整如下。

首先将图 4(a) 中第 6 和第 7 航段的交汇点向下平移, 使 6、7 航段满足与受限区的最小距离限制的要求; 然后将图 4(a) 中的航段 1、2 截弯取直, 合并为如图 5(a) 中的第 1 航段, 同理将 4(a) 中的航段 3、4 合并为第 2 航段, 将航段 5 和第一步调整后的航段 6 合并为第 3 航段, 航段 7 变为第 4 航段, 最后生成只有 4 段的改航路径, 见图 5(a)。经验证进一步调整后的改航路径满足约束条件, 航空器运行步数变为 231 步, 参数评估见图 5(b)、(c)。

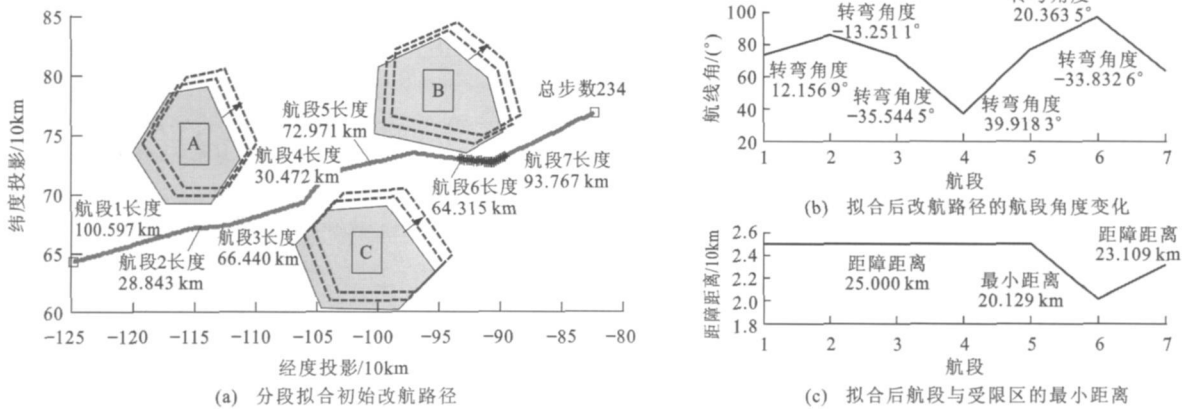


图 4 改航路径分段拟合及参数评估

Fig. 4 Sub-fitting of rerouting path and evaluation of parameters

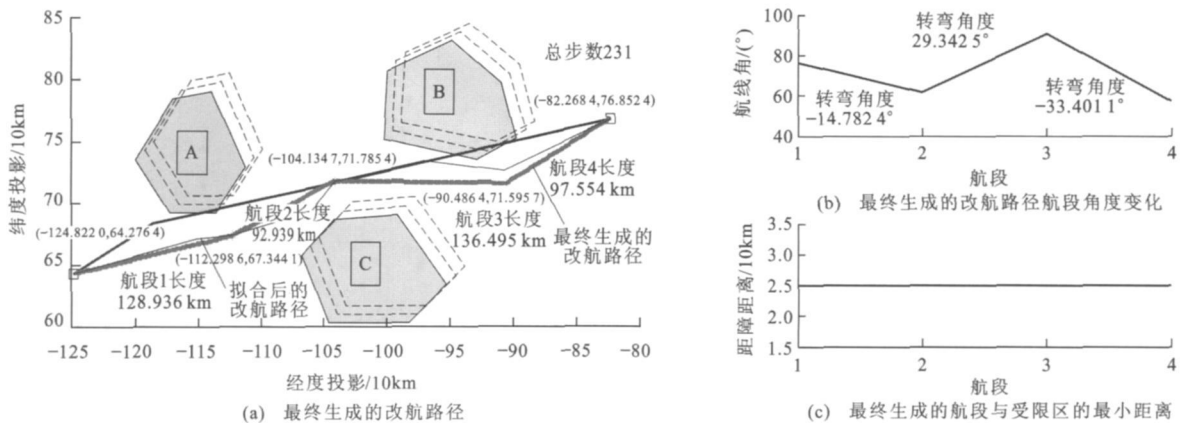


图 5 最终生成的改航路径及参数评估

Fig. 5 Final rerouting path and evaluation of parameters

3.4 与现行改航方法对比

现行的沿扩展受限区边界绕飞的改航方法需要先计算出未来 45 min 内雷暴云的影响区域, 见图 6 的深色区域和短直线表示的区域, 再以这些受影响区域为基础向外扩展 25 km 生成扩展的受限区, 见图 6 中浅色区域, 最后沿扩展的受限区边界进行绕

飞, 来生成改航路径。

原计划航线总长度为 444.059 km, 采用改进人工势场路径规划模型生成的改航路径长度为 455.924 km, 采用沿扩展受限区边界绕飞的改航路径长度为 532.299 km。分析可知, 采用改进人工势场路径规划模型生成的改航路径比原计划航线长了

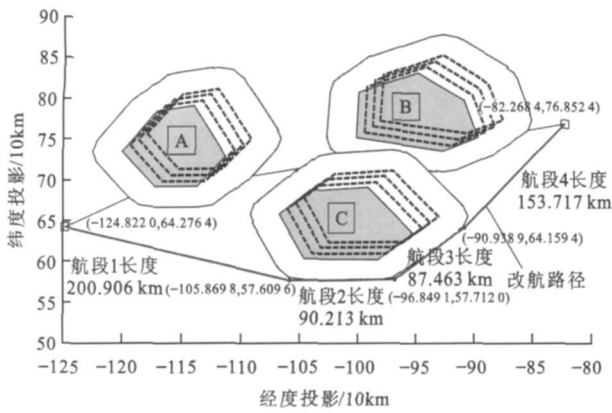


图6 沿扩展受限区边界绕飞的改航路径

Fig. 6 Rerouting path flying around expanded area boundary

11. 865 km, 增加了 2.67%, 转弯点没有增加, 都为 3 个, 在合理的范围内, 且比采用沿扩展受限区边界绕飞的改航路径要短 76.375 km, 缩减了 14.35%。该路径规划模型通过实时测量与雷雨区域的距离实现动态绕飞, 规划的航线更加灵活有效。

4 结 语

本文将人工势场算法应用于航空器改航路径的规划, 结合航空器运动特点对传统势场路径规划模型进行了改进, 从实际可操作性出发, 针对转弯角度、航段距离和改航点数量等约束条件, 提出改航路径的分段线性拟合与调整的修正方法。算例仿真表明, 该模型通过实时分析航空器与动态云团以及目标点的相对位置, 计算航空器所受合力, 自动生成改航路径, 方法简便, 计算实时迅速, 且生成的改航路径比采用沿扩展受限区边界绕飞的改航路径要短。

但是由于人工势场算法为局部最优规划方法, 生成的路径不一定为全局最优值, 且当引力与斥力大小相等方向相反时, 存在局部极小值点。采用何种方法有效消除局部极小值点, 并使规划的路径为全局最优解, 是将来研究的主要内容。

参考文献:

References :

[1] 宋 柯. 空中交通流量管理改航策略初步研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2002.
SONG Ke. The research of rerouting problem in air traffic flow management[D]. Nanjing: Nanjing University of

Aeronautics and Astronautics, 2002. (in Chinese)

- [2] 田 勇, 宋 柯, 顾英豪. 空中交通流量管理中的改航策略研究[J]. 数学的实践与认识, 2008, 38(10): 70-76.
TIAN Yong, SONG Ke, GU Ying-hao. The research on rerouting problem in air traffic flow management [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2008, 38(10): 70-76. (in Chinese)
- [3] 李 雄, 徐肖豪, 朱承元, 等. 基于几何算法的空中交通改航路径规划[J]. 系统工程, 2008, 26(8): 37-40.
LI Xiong, XU Xiao-hao, ZHU Cheng-yuan, et al. Air traffic reroute planning based on geometry algorithm [J]. Systems Engineering, 2008, 26(8): 37-40. (in Chinese)
- [4] PRETE J M. Aircraft routing in the presence of hazardous weather[D]. New York: Stony Brook University, 2007.
- [5] 顾英豪. 恶劣天气下终端区进场航空器的改航研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
GU Ying-hao. Aircraft arrivals dynamic rerouting in terminal area under weather uncertainty[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008. (in Chinese)
- [6] 刘 义, 张 宇. 基于改进人工势场法的移动机器人局部路径规划的研究[J]. 现代机械, 2006(6): 48-49, 53.
LIU Yi, ZHANG Yu. Study of local path planning of mobile robot based on improved artificial potential field method [J]. Modern Machinery, 2006(6): 48-49, 53. (in Chinese)
- [7] 况 菲, 王耀南, 张 辉. 动态环境下基于改进人工势场的机器人实时路径规划仿真研究[J]. 计算机应用, 2005, 25(10): 2415-2417.
KUANG Fei, WANG Yao-nan, ZHANG Hui. Real time path planning of mobile robot in dynamic world based on improved artificial potential field [J]. Computer Applications, 2005, 25(10): 2415-2417. (in Chinese)
- [8] 王 萌, 王晓荣, 李春贵, 等. 改进人工势场法的移动机器人路径规划研究[J]. 计算机工程与设计, 2008, 29(6): 1504-1506.
WANG Meng, WANG Xiao-rong, LI Chun-gui, et al. Study of local path planning of mobile robot based on improved artificial potential field method [J]. Computer Engineering and Design, 2008, 29(6): 1504-1506. (in Chinese)
- [9] 李士波, 孙秀霞, 李海军. 多约束条件下的飞行器航迹规划算法[J]. 电光与控制, 2007, 14(2): 34-37.
LI Shi-bo, SUN Xiu-xia, LI Hai-jun. Realization of 2D grid-based route planning algorithm [J]. Electronics Optics and Control, 2007, 14(2): 34-37. (in Chinese)
- [10] 李春生. 雷暴——航空飞行的天敌[J]. 空中交通管理, 2006(1): 38-39.
LI Chun-sheng. Thunderstorm—natural enemy of aviation [J]. Air Traffic Management, 2006(1): 38-39. (in Chinese)